心理科学进展 2019, Vol. 27, No. 7, 1284–1296
Advances in Psychological Science DOI: 10.3724/SP.J.1042.2019.01284

博弈论视角下的超扫描多人互动任务新模型

卑力添[1] 蒋 柯[2] 李先春[1] 熊哲宏[1]
([1]华东师范大学心理与认知科学学院, 上海 200062) ([2]温州医科大学精神医学学院, 浙江 温州 325035)

摘 要 超扫描指同时记录多个被试脑活动，以探索其社会互动脑机制的研究手段。从博弈论视角，可区分超扫描任务中的冲突、合作与协作三类任务，分离已有研究中未严格界定的"协作"与"合作"概念，为超扫描研究的多人互动范式建立新模型。任务所包含协作因素的多少，与任务是否涉及心理理论功能是影响个体脑间活动同步现象的重要条件。未来研究可结合进化博弈论等理论模型，进一步探索合作与协作行为的差异及规范形成的心理与神经机制。

关键词 合作；协作；博弈论；多人互动；超扫描
分类号 B849: C91

1 引言

近年来，探索社会互动中的心理与神经机制日益成为社会认知科学研究的热点。基于社会互动由多人参与的本质，在互动过程中单独扫描单个被试的脑活动已难以满足进一步探索其脑机制的需要(Hasson, Ghazanfar, Galantucci, Garrod, & Keysers, 2012; Koike, Tanabe, & Sadato, 2015)。为此，同时扫描多名被试脑活动的新技术——超扫描由此诞生。

超扫描(hypersacnning)也可译为"同步交互记录技术" (张文莉，唐红红，刘超，买晓琴, 2016)。与传统单脑研究相比，超扫描技术不关注单个大脑的活动变化，而是致力于探索多个大脑活动的同步情形，即脑间活动的同步(Inter-brain synchronization) (Dumas, Lachat, Martinerie, Nadel, & George, 2011)。脑间活动同步指多名被试间脑活动信号的相关或相干水平，用于衡量其脑活动的相似或同步程度，其指标越高，意味着个体间的脑活动情形越趋于相似(李先春，卑力添，袁涤，丁雅娜，冯丹阳, 2018)。超扫描研究中，研究者常设置一系列互动任务，通过比较多名被试在真人互动、单人任务、人机互动等条件下的脑间活动情形，探究社会互动中的多人脑机制，而互动情境中个体间的合作行为也已成为超扫描研究的重要主题(Babiloni & Astolfi, 2014)。

然而，已有超扫描研究在描述、阐释其研究结论时存在的共同问题为：未能对互动情境所要考察的核心目标——"合作"给予精确定义与分类。超扫描研究中常用的合作任务类型包括经济决策(Astolfi et al., 2009)、联合按键(Funane et al., 2011)、回合型互动游戏(如棋盘游戏；Liu, Saito, Lin, & Saito, 2017)及合奏合唱等音乐合作任务(Osaka et al., 2015; Pan, Cheng, Zhang, Li, & Hu, 2017; Sänger, Müller, & Lindenberger, 2013)。以上研究中，诸多研究者采用"合作性"这一定义(cooperative)对任务进行描述(De Vico Fallani et al., 2010; Funane et al., 2011; Liu et al., 2016; Osaka et al., 2015)。这些不同的合作任务之间是否存在实质性的差异？不同任务中个体的行为与脑活动结果是否反映了同一种认知活动——"合作性"？为解答以上问题，本文认为，引入博弈论中的"协作"、"合作"与"冲突"概念以取代已有研究中较为宽泛的"合作性"表述，可更准确、深入地描述超扫描范式中的各类任务。

2 协作、合作与冲突——博弈论视角下的多人互动任务

2.1 已有的超扫描多人互动任务模型

为系统地呈现超扫描领域所采用多种实验范式的全貌，一系列研究者先后对该领域中所用的

收稿日期：2018-07-31
通信作者：熊哲宏, E-mail: zhxiong@psy.ecnu.edu.cn

任务做出了归纳与总结。Babiloni 等人(2014)最早总结了超扫描研究中使用的具体任务，但并未对任务做出明确分类。郑丽莉、成晓君、胡谊和李先春(2015)依据任务内容，将超扫描任务范式分为联合操作、联合决策、接收者−发送者任务三种类型：联合操作任务中，两名被试被要求同时做出反应，如联合按键任务中，被试需要尽可能同时按键(Cui, Bryant, & Reiss, 2012; Funane et al., 2011)；联合决策任务中，被试需共同做出一系列决策，双方的选择均会对彼此的收益与损失产生影响，如囚徒困境博弈等经济决策任务(Astolfi et al., 2009; De Vico Fallani et al., 2010)；接收者−发送者任务则要求一名被试向另一名被试传递信息，以考察被试在言语沟通或非言语沟通中的脑活动(Anders, Heinzle, Weiskopf, Ethofer, & Haynes, 2011; Stephens, Silbert, & Hasson, 2010)。这一分类概括了超扫描研究中常用的三类主要任务，但未能对各类任务间的具体差异与联系进行讨论与归纳。

Liu 和 Pelowski (2014)则进一步细分了不同任务的特征及其差异，通过以下三个维度区分超扫描研究中的双人互动任务：(1)互动结构，指任务中的两名被试是按一定次序轮流行动以进行交流(turn-based interaction)，如下象棋，还是两人按照一定规则同时行动以争取达成一致(concurrent interaction)，如双人跳水的运动项目；(2)任务结构：指双方在任务中的角色为相互依赖(interdependent)，或彼此独立(independent)，前者如网球，每名球员的行为和动作会对另一名球员产生影响，后者如赛跑，不同运动员各自奔跑，独自进行运动；(3)目标结构：指双方任务目标以合作(cooperative)或竞争(competitive)的形式呈现，前者涉及帮助他人完成目标，后者则旨在阻碍他人完成目标。这一分类维度使得研究者得以从更精细的角度比较不同任务间的差异与联系。

以上分类较全面地总结了超扫描迄今为止的已有任务范式与特征，但均未能对超扫描研究中的“合作性”概念提供清晰的定义与界定，体现在难以解释以联合按键为代表的动作同步类任务和以囚徒困境博弈为代表的经济决策类任务间的差异。联合按键任务要求两名被试尽可能做到同时按键，按键时机越接近，代表其任务成绩越好(Funane et al., 2011)；囚徒博弈任务则需要两名被试各进行一次决策，在合作与背叛策略中做出选择(Astolfi et al., 2009)。按照郑丽莉等人的分类方式，以上两类任务分别属于“联合操作”与“联合决策”任务范畴，难以体现两者间的联系与共性为何；Liu 等人则将囚徒博弈与联合按键任务共同归类为合作任务，却难以解释两者间的差异：囚徒博弈任务中存在“背叛”这一非合作因素，而联合按键任务中却并不存在。面对以上问题，引入博弈论观点或将对超扫描范式的进一步划分有所帮助。

2.2　协作、合作与冲突——来自博弈论的观点

博弈论是指利用数学模型研究多个个体的决策及其交互影响的理论，常用于描述、解决不同社会主体间的利益冲突(Myerson, 1997)。由于超扫描研究中的实验范式常涉及个体间决策与行动对任务成败、个体收益的影响，引入博弈论可很好解释超扫描研究中的现有任务。博弈论框架中，协作、合作与冲突的界定可分别通过相应的博弈规则来表现：即协作博弈(coordination game)、合作博弈(cooperation game)与冲突博弈(conflict game)。

2.2.1　协作博弈

协作博弈，又称完全合作(pure collaboration)博弈，指博弈过程中双方利益始终一致的博弈类型(Schelling, 1980)，无论双方如何决策，其各自的收益与损失均完全一致，即双方必然一同获胜，或一同失败。在这一博弈规则下，由于双方利益一致，合作已成为其必然选择，两名博弈者仅需考虑如何与对方达成配合，实现共赢，而不需考虑如何处理自我与他人之间的利益分配问题(De Jonge, 1998)。典型的协作任务如头尾游戏(如图 1)：游戏中双方可选择“头” (Heads)或“尾” (Tails)两种选项：如均选“头”或均选“尾”，双方均可获得收益(图 1 中的(5, 5))；如一方选头一方选尾，则双方均无法获得收益(图 1 中的(0, 0))，体现了协作博弈双方共享输赢结果的特征(Colman, 2003)。

	Heads	Tails
Heads	5, 5	0, 0
Tails	0, 0	5, 5

图 1　头尾游戏的决策与收益矩阵：“Heads”与“Tails”分别代表选择头与尾的决策；表格中数字代表两名个体在不同决策情形下所获收益

2.2.2 合作博弈

合作博弈，又称混合动机博弈(mixed-motive games)、谈判博弈(bargaining games)，指个体间利益并非始终一致，而取决于其具体决策的博弈类型(Schelling, 1980)。合作博弈涉及自我与他人间资源的分配，即个体是否应选择牺牲一定的个人利益或承担一定的风险以保障他人的获益，还是选择损失他人利益以尽可能保障自身的收益(De Jonge, 1998; Roos, Gelfand, Nau, & Lun, 2015)。合作博弈问题可通过社会困境问题(social dilemma)来考察，其典型例子为囚徒困境博弈(Colman, 2003)。囚徒困境博弈中的双方将在无沟通情形下独立进行决策，其决策与收益矩阵如图2：可选择“合作”或“背叛”两种策略，如均选择合作，两人均可得到较大收益(图 2 中的(3, 3))；如均选择背叛，双方都会受到一定惩罚(图中的(2, 2))；如一方选择背叛一方选择合作，合作方会受较大惩罚，使背叛方获得极大收益(图 2 的(4, 1))与(1, 4))，体现了合作博弈中双方利益关系取决于具体决策的特点。

	C	D
C	3, 3	1, 4
D	4, 1	2, 2

图 2 囚徒博弈的决策与收益矩阵：C (cooperation)、D (Defection)分别代表合作与背叛策略；表格中的数字代表两名个体在不同决策情形下所得收益

2.2.3 冲突博弈

冲突博弈是博弈双方利益始终不一致的博弈类型，又称纯粹冲突博弈(pure conflict game)、零和博弈(zero-sum game) (Schelling, 1980)。在该类博弈中，双方以彼此竞争为行动前提，其关注点在于如何猜测对方的决策，并在此基础上做出有利于自身的选择。国际象棋即为冲突博弈的典型代表(如图 3)：该规则下，共同参与博弈的两名棋手中仅能有一人胜利，导致两名玩家间的利益始终不一致：玩家 A 的胜利将以玩家 B 的失败为前提，B 的成功也必然导致 A 利益的损失。图 3 矩阵中，1 代表胜利，0 代表失败，仅存在(0, 1)与(1, 0)两种收益组合，即双方仅有一方能赢，体现了冲突博弈中双方利益对立的特点。

	Win	Lose
Win	/	1, 0
Lose	0, 1	/

图 3 国际象棋的收益矩阵：表格中的数字代表了两名个体的收益情形

综上可知，个体间的利益关系可用于区分不同的博弈类型：协作博弈中个体的收益一致，共同进退是他们决策的前提与必然选择，其关注点在于如何实现协作，即如何在多个可能的策略中选出和对方相匹配的策略；合作博弈中，个体收益并非始终一致，而视个体是否选择合作策略而定，其关注点在于个体如何在“合作”与“背叛”中选择，即如何在自身与他人间进行资源分配(De Jonge, 1998; Miller, 2007)；在冲突博弈中，任务间个体的利益始终存在冲突，以竞争为必然目的，其任务目标要求个体与对方争夺有限的资源。借助这一准则，我们可以将以上博弈情形推广到社会互动领域，从而对超扫描研究中的各类多人互动任务进行更为细致的划分。

2.3 博弈论视角下的多人互动任务新模型

Schelling (1980)最早认为，纯粹的协作博弈与冲突博弈是一个连续体的两个极端，而其它同时具备协作与冲突因素的博弈则处于两端之间：纯粹的协作博弈以双方利益的一致为前提，仅包含协作因素，即彼此间的配合与协同；纯粹的冲突博弈则以双方利益的对立为前提，仅包含冲突因素，即对彼此资源的争夺。借鉴以上观点，依据协作因素从多至少的排列，超扫描领域中已有的多人互动任务可分为协作任务、合作任务与冲突任务三大类别，对应协作博弈、合作博弈与冲突博弈三种博弈形式：

a. 协作任务：仅存在协作因素而不存在冲突因素的任务。该类任务中双方的利益始终一致。代表性任务为联合按键任务(Cui et al., 2012; Funane et al., 2011)。此类任务中，被试双方默认合作为共同选择，只需要配合对方做出反应，可考察被试间的配合与协同能力；

b. 合作任务：同时存在协作因素与冲突因素的任务。该类任务多为社会困境问题，包括囚徒博弈等社会经济决策任务(De Vico Fallani et al., 2010; Astolfi et al., 2010)，被试需要决定采用合作或背叛策略，可考察被试在自我与他人间进行资源分配的倾向；

c. 冲突任务：即仅存在冲突因素的任务。该类任务包括两种出现形式：一类为协作任务的对照任务，如联合按键任务的对照任务——竞争按键任务(Cui et al., 2012)；一类为以考察冲突行为本身所包含的心理与行为机制为目的，如猜物游戏(handy-dandy) (Montague et al., 2002)、沙牌游戏(stud poker) (Zhang, Liu, Pelowski, & Yu, 2017)等涉及欺骗的零和博弈任务。

此外，根据任务中双方的互动方式的差异，本文参考Liu和Pelowski (2014)等人的分类方式，将已有超扫描研究中的任务互动方式分为以下三类：

a. 同时型互动任务(concurrent task)：该类任务中，被试被要求同时行动以完成任务，如联合按键任务(Funane et al., 2011)；

b. 回合型互动任务(turn-based task)：被试被要求按一定次序轮流互动，如进行轮流搭建积木任务(Liu et al., 2016)；

c. 高生态效度下的实时互动任务：该类任务通常更接近现实中的日常互动情形，被试间的互动所受制约较少，其沟通方式具备动态性、自发性，不同被试行动的时机存在交叉重叠的现象(Hari, Henriksson, Malinen, & Parkkonen, 2015)，并包含三人或三人以上的沟通形式。

综上所述，参考 Schelling (1980)与 Liu 和 Pelowski (2014)等人的标准，基于任务类型与互动方式两大维度，本文为超扫描研究中多人互动任务范式建立了新模型(表 1)。

3 超扫描研究中的协作、合作与冲突任务

在划分已有超扫描互动任务类型的基础上，本文将回顾现有超扫描研究中的各类任务范式(表 1)，并对其主要研究成果加以总结。在任务所属类型上，协作任务、合作任务与冲突任务均在超扫描研究中有所涉及。在各任务的互动方式上，协作任务所具备的互动方式最多，包含同时型协作任务、回合型协作任务与高生态效度下的实时互动协作任务；合作任务中，被试间的互动均以回合型互动实现，仅存在回合型合作任务；冲突任务中同时包含同时型冲突任务与回合型冲突任务，前者多用于协作任务的控制条件，后者则用于考察欺骗与谎言识别等仅存在冲突因素的社会互动情境。

3.1 协作任务的研究范式

3.1.1 同时型协作任务

同时型协作任务中，两名被试需同时完成任务操作，实现协同与配合。由于被试常被要求完成相同操作，这种实时的协作行为也被称为同步(synchronization) (Louwerse, Dale, Bard, & Jeuniaux, 2012)。

表 1 博弈论视角下的超扫描多人社会互动任务模型

互动方式/任务类型	协作任务	合作任务	冲突任务
同时型互动任务	联合按键 手势与节奏同步 合奏、合唱 言语交流 手势猜词 表情与眼神交流	/	竞争条件下的协作任务 (竞争条件下的联合按键)
回合型互动任务	棋盘游戏 积木游戏 视觉搜索任务 盲人驾驶任务 电子桌球游戏	囚徒博弈 斗鸡博弈 信任博弈 独裁者博弈 最后通牒博弈	竞争条件下的协作任务 (竞争条件下的棋盘游戏、积木游戏、视觉搜索、桌球游戏等) 猜物游戏 沙牌游戏
高生态效度下的实时互动任务	模拟飞行 医护-患者互动 课堂教学 无领导小组讨论	/	/

联合按键：联合按键是超扫描研究中应用最广的任务之一。两名被试被要求在接收提示后尽可能同时按键，双方按键时间越接近，代表其协同程度越高，任务成绩越好。双方被试利益在所有情形下均完成一致：若同时按键则双方均获胜，若未同时按键，双方均失败，体现了其作为协作任务的特征。Funane 等人(2011)在研究中最早发现，合作成绩更高的被试间也出现了更高的脑间活动同步，此后诸多超扫描研究均支持了这一结论：即被试的按键行为同步与其脑间活动同步存在正相关(Baker et al., 2016; Cui et al., 2012; Hu, Hu, Li, Pan, & Cheng, 2017; Liu et al., 2016; Liu, Saito, & Oi, 2015; Mu, Guo, & Han, 2016; Pan et al., 2017; 叶佩霞，朱睿达，唐红红，买晓琴，刘超, 2017)。这一范式易于操作，对协作成绩有清晰的量化标准(通常为反应时之差(Cui et al., 2012; Mu et al., 2016; Pan et al., 2017))，但其任务内容缺乏生态效度与高级认知功能的参与，限制了其结论向现实情境的推广。

手势与节奏同步：手势同步任务最早由 Dumas 等人(2010)引入超扫描研究。该任务要求被试模仿对方的手势，以研究动作同步的神经基础。节奏同步任务则将具体手势的同步简化为节奏的同步，要求双方按相同的频率敲击器物，研究此情形下双方脑活动的变化(Konvalinka et al., 2014; Naeem, Prasad, Watson, & Kelso, 2012; Tognoli, Lagarde, DeGuzman, & Kelso, 2007)。与联合按键任务相似，手势与节奏同步范式下的研究也得到了动作越同步，脑间活动同步越高的结论(Dumas et al., 2010; Filho et al., 2016; Yun, Watanabe, & Shimojo, 2012; Zhdanov et al., 2015; Zhou, Bourguignon, Parkkonen, & Hari, 2016)。脑间活动同步出现于镜像神经元(Schippers, Roebroeck, Renken, Nanetti, & Keysers, 2010)、感觉运动区(Zhdanov et al., 2015)、前额叶与右侧额顶叶(Balardin et al., 2017)等脑区，这体现了此类任务同时涉及了感知运动功能与对他人动作信息及意图的解读，并使被试在此过程中以内隐方式达成了一致(Knoblich, Butterfill, & Sebanz, 2011; Vanutelli, Nandrino, & Balconi, 2016)。

合奏、合唱与言语及非言语交流任务：相比联合按键与手势、节奏的同步，音乐与交流是日常生活中更常见的协作形式。合奏与合唱任务中，多名被试被要求彼此配合共同演奏、演唱一些旋律片段，并发现合奏与合唱过程中参与者间普遍存在广泛的脑间联结(Babiloni et al., 2012; Lindenberger, Li, Gruber, & Müller, 2009; Müller, Sänger, & Lindenberger, 2013; Novembre, Sammler, & Keller, 2016; Sänger, Müller, & Lindenberger, 2012)。而在交流任务中，被试需要通过言语(Ahn et al., 2018; Pérez, Carreiras, & Duñabeitia, 2017; Spiegelhalder et al., 2014; Stephens et al., 2010; Tadić, Andjelković, Boshkoska, & Levnajić, 2016)、手势(Schippers et al., 2010)、表情(Anders et al., 2011)、眼神(Cavallo et al., 2015; Hirsch, Zhang, Noah, & Ono, 2017; Leong et al., 2017; Saito et al., 2010)或符号(Stolk et al., 2014)来完成信息传递与互动，其典型任务如手势猜词(gestural word)：一名被试需要通过另一名被试的手势猜测其所表达的意图(Schippers et al., 2010)，而非单纯的模仿。可见与联合按键与手势节奏同步两类任务不同，音乐合作与实时交流任务中，被试间的协作并非单纯以动作同步形式出现，也体现为角色间的分工与行为的互补。

3.1.2 回合型协作任务

回合型协作任务中，被试被要求按回合轮流完成任务。相对于同时型任务侧重动作层面的同步、互补与配合，回合型协作任务通常更强调同一任务目标下揣测他人心理以使双方达成一致选择的过程，即相较于行为同步，更强调心智的同步(mindset synchrony) (Liu & Pelowski, 2014)。

棋盘任务：Liu 等人(2015)设计了棋盘任务以研究合作与竞争情形下的脑机制：实验中，一名被试需要用黄色棋子在棋盘摆放出规定的图案；而另一位被试则会使用蓝色棋子帮助同伴完成任务图案。而在竞争条件下，使用蓝色棋子的被试则被要求阻碍同伴摆放出目标图形。实验结果表明，两名被试右侧后颞上沟(pSTS)在合作与竞争条件下均出现显著的脑间活动同步，在竞争条件下仅有额下回(IFG)和顶下小叶 (IPL)区显示出了脑间活动的同步，且其右侧 IFG 的同步程度与任务表现正相关。研究者认为，竞争条件下为阻碍对方实现目标而活动时更需要积极地追踪对手的行动，为此，两人在与意图理解与共情功能高度相关的 IFG 脑区出现了显著的同步。为解决在合作条件下协助者缺乏参与动机的问题，在改进的实验中，Liu 等(Liu & Pelowski, 2014; Liu et al.,

2017)增加了协作者在目标图案构筑中的作用：其最后摆放的蓝色棋子可转变为黄色，变为目标图形的一部分。

积木任务：Liu 等人(2016)则利用积木游戏(Jenga Game)探索个体合作与竞争的神经基础。该实验的合作条件下，两名被试被要求在给定的时间内尽可能地堆高一叠积木，并在移动积木前与对方讨论；竞争条件下，实验目标为让积木在对方的回合倒塌，两名被试需要给予对方虚假建议以干扰其积木搭建；而单人条件下被试各自搭建自己的积木，互不交流。实验发现，竞争和合作条件下两名被试在与心理理论功能相关的 Brodmann 8 区均出现了脑间活动同步。这一范式与棋盘任务均发现了存在于竞争情形下的脑间同步情形，拓展了心理理论对脑间联结的解释能力。尽管两实验均以“合作” (cooperative)描述其实验条件，但由于在其“合作”条件下并未涉及双方利益的冲突与资源的分配，其类型仍然属于本模型中的协作任务。

其它回合型协作任务：此外，仍存在其它回合型协作任务，如双人视觉搜索任务(Balconi, Pezard, Nandrino, & Vanutelli, 2017)、“盲人驾驶”任务(Krill & Platek, 2012)、电子桌球游戏(Sinha, Maszczyk, Zhang, Tan, & Dauwels, 2016)等。在个体间的利益关系上，这些任务的实验条件均不存在个体间利益的冲突与资源分配问题，为此属于协作任务；在任务结构上，这些任务均要求两名被试按照回合次序轮流行动，以完成共同目标，是回合型协作任务的共同特点。

3.1.3 高生态效度下的实时协作任务

此外，一些研究者尝试将具备更高生态效度、更接近日常情境的协作任务引入超扫描研究。该类研究通常与实验室环境下的协作任务有以下区别：首先，个体在任务中获得收益或遭受损失的规则并非由人为设定，而是内隐地表现在日常工作、生活环境的具体场景中。如 Astolfid 等(2011)与 Toppi 等人(2016)利用 EEG 超扫描记录了飞行员与其副手在模拟飞行中的脑活动，两人需要在飞行过程中互相配合以完成模拟飞行任务：如两人均配合工作，则均可以从合作驾驶中受益，如至少有一方不配合，则两人都会面临威胁与损失，即两人的利益始终一致，体现了协作博弈的特点。尽管以上规则并未由研究者人为提出，但已作为被试的工作环境中的必然要求被两人遵守。Kawano 等人(2016)使用便携式 EEG 设备测量了护士与病人在抽血过程中的脑间活动同步情形，同样为个体在日常情境中的协作任务。其次，高生态效度的协作任务往往不局限于一对一的被试交流，而能涉及多个被试间的互动。例如，教学活动同样存在协作任务的属性，教师与学生在教学中利益一致，需要通过彼此间的配合达成知识的传授。除一对一的教学任务外(Holper et al., 2013)，一些研究者已成功利用 fNIRS 超扫描技术同时收集课堂教学中 12 名师生的脑数据，以探索日常环境中的教学活动脑机制(Dikker et al., 2017)。此外，包含三人及三人以上的超扫描协作任务范式还包括：无领导小组讨论(Jiang et al., 2015)、多人参与的合奏与合唱任务(Babiloni et al., 2012; Duan et al., 2015)，均体现了考察日常环境中协作任务多人脑机制的趋势。

3.2 合作任务的研究范式

目前超扫描研究中所涉及的合作任务范式均为经济决策任务，多以轮流形式进行，包括：囚徒博弈、斗鸡博弈、独裁者博弈、最后通牒博弈、信任博弈等。

囚徒困境与斗鸡博弈：Babiloni 等(2007)与 Astolfi (2009)等人最早将囚徒困境博弈作为互动任务应用于 EEG 超扫描研究，发现仅在双方均做出合作决策时出现了前额叶的脑间活动同步，并得到了后续研究的支持(De Vico Fallani et al., 2010)。囚徒博弈中，对单个个体而言，选择“背叛”是最为理性的选择；而从总体收益最优的角度来看，选择“合作”能使双方收益总和最大化(Dawes & Messick, 2000)。换言之，被试需要在保证自身利益最大化的背叛策略和有一定风险但可谋求双方共同利益最大化的合作策略之间选择。该任务反映了如何在自我与他人间进行利益分配的问题，体现了其合作任务的本质。作为囚徒博弈的变种，斗鸡博弈也反映了类似内容，其差别在于斗鸡博弈中如双方均选择背叛均将得到最大惩罚，从而使被试对背叛策略的选择更为谨慎。Astolfi 等人(2010)在斗鸡博弈中发现，仅在合作条件下，被试双侧眶额皮层与左侧 Broadman 7 区及扣带回运动皮层出现显著脑间联结。以上结果首次从多人脑层面提供了证据，表明抽象的“合作”与“背叛”概念的差异确存在其神经基础，且能

通过脑间活动同步这一指标来体现。

信任博弈：King-Casas 等人(2005)首次将信任博弈引入 fMRI 超扫描研究。任务中，作为“投资者” (investor)的被试有权将自身初始金额的任意部分分给另一名被试——“受托人” (trustee)。“受托人”分得的金额将按一定倍数增长，并可将增长后金额的任意部分回馈给“投资者”。多次进行的信任博弈则可用以模拟现实情境中信任关系的建立。由于该博弈中被试被划分为信任者与被信任者的不同角色，研究者得以观察同一个体在扮演不同角色时的差异，如 Chiu 等人(2008)发现高功能自闭症患者在自己做决策时与观察他人做决策时，表现出了不同于正常人的扣带回激活，换言之，此类患者能对他人的行为意图进行解读，但却无法顺利解读自身的行为，这体现了这一范式对侦测个体对自我-他人决策解读能力差异的功能。

独裁者博弈与最后通牒博弈：借助独裁者博弈，Astolfi 等人(2015)利用 EEG 超扫描探究了第三方惩罚情形中的共情机制。任务中，独裁者可将所获得初始金额按任意比例分配给一名接收者。而惩罚者可以选择损失部分收益使独裁者蒙受损失，并将其损失的三分之一作为收益传递给接收者。通过分析惩罚者与接收者之间的脑间联结，研究者发现被试间的脑间联结紧密程度与共情水平正相关。与独裁者博弈类似，最后通牒博弈中独裁者同样可自由决定自身与接收者间的金额分配，但接收者拥有否决分配方案的决定：否决情形下双方收入均为 0。借助这一范式，Tang 等人(2016)利用 fNIRS 超扫描发现面对面交流引起了被试间右侧颞顶联合区脑间一致性的增加，及其合作行为与实际收益的提升。

3.3 冲突任务的研究范式

由于冲突任务中个体间的利益始终对立，每位被试都以与对手争夺有限的资源为任务目的(Schelling, 1980)。超扫描研究中，冲突任务常以协作任务的控制条件出现，如与联合按键任务对应的竞争按键任务(Cui et al., 2012)，或回合型协作游戏中的竞争条件(Balconi & Vanutelli, 2017; Liu et al., 2016; Liu et al., 2017)。然而，在一些针对欺骗与谎言的研究中，冲突任务本身则成为了研究的主题，如猜物游戏(handy-dandy)与沙牌游戏(stud poker)。

猜物游戏：Montague 等人(2002)最早以猜物游戏进行了 fMRI 超扫描研究：实验中，两名被试分别扮演信息发送者与接收者：信息发送者将接收到关于“红”、“绿”两种颜色中的任意一种，并选择是否告知接收者正确的颜色，接受者则需选择是否相信发送者给予的信息并对颜色做出猜测。如接收者猜出正确颜色则接收者获胜，反之则发送者获胜。这一范式中，双方的利益始终冲突，呈典型的零和博弈，符合冲突任务的特征。实验结果表明，双方大脑辅助运动区均出现显著激活，其脑激活模式在 0.04 Hz 频段达到最高的相干度。

沙牌游戏：Zhang 等人(2017)利用沙牌游戏探究欺骗的神经基础：实验中，两名被试分别扮演“庄家” (banker)和“闲家” (follower)，需要各抽一张扑克比较点数大小。点数大的人赢得赌博。扑克点数揭晓前，庄家有特权提前看到自己扑克的点数，而闲家仅能在双方扑克点数揭晓后才能知道自己与对方的点数为何。如闲家选择“跟注” (call)，则双方会比较扑克大小，点数大者获得双方筹码的金额；如闲家不选择“跟注”，则庄家自动获胜，并获得相当自己筹码的金额。这一任务中，庄家需要以欺骗或非欺骗策略做出有利自己的选择：如在自己牌点数较低时，可选较大的筹码以威吓闲家，使其误以为难以取胜而放弃“跟注”，或选较小的筹码，使得闲家“跟注”后博弈失败的损失降到最小。实验结果表明仅女性被试在进行欺骗时颞上沟(STS)脑间活动同步与目光接触行为正相关，为解释欺骗的性别差异提供的脑机制层面的依据。

4 引入博弈论视角下多人互动任务模型的意义

回顾已有研究结论，本文认为从博弈论视角入手，建立新的超扫描多人互动任务模型，对该领域研究的进一步发展具备以下意义：

4.1 区分协作任务与合作任务的差异

已有超扫描研究中，“协作任务”与“合作任务”一直未得到严格区分。而通过引入博弈论概念，可清楚区分两类任务及其所涉及的心理过程的差异：协作任务中，不同个体的利益始终一致，使协作成为其必然选择，个体仅需考虑如何根据对方可能的决策达成协作(De Jonge, 1998)，如被试在联合按键与动作同步任务中的表现(Funane et al.,

2011); 在合作任务中, 个体间的利益并非始终一致, 个体不仅应考虑应选择合作策略或背叛策略, 还需揣测对方可能的回应方式, 以进行合作或对抗, 如被试在囚徒博弈等任务中的决策(De Vico Fallani et al., 2010)。

综上可知, 协作任务的考察对象为利益一致时, 个体揣测他人意图、配合他人行为的动机与能力, 而合作任务则旨在考察个体处理自我与他人间利益分配关系的心理过程。两者所考察的心理过程存在本质的不同。为此, 将"联合按键任务"等协作任务笼统归纳入合作概念, 并用合作性一词共同描述两类任务, 将会混淆任务所测量的心理机制, 并为后续研究及其结论的整合带来困难。这使重新审视合作与协作概念, 对两者进行进一步划分具有重要意义。

4.2　超扫描研究成果的整合

博弈论视角下多人互动任务模型的建立有利于各任务范式下研究成果的整合。通过整合该模型中的各任务类别下的研究, 可初步得到以下结论:

a. 协作任务: 相对单人任务、人机互动等控制条件, 被试在与真人互动的协作任务中出现了更高脑间活动同步。这一现象在同时型与回合型协作任务中均可出现(Cheng, Li, & Hu, 2015; Cui et al., 2012; Funane et al., 2011; Hu et al., 2017; Liu et al., 2016; Liu et al., 2017; Liu et al., 2015; Mu et al., 2016; Pan et al., 2017), 且在同时型任务中, 个体间的脑间活动同步与其协作任务的成绩存在正相关, 体现为个体间的动作同步性越强(Cheng et al., 2015; Cui et al., 2012; Funane et al., 2011; Hu et al., 2017; Mu et al., 2016; Pan et al., 2017), 或个体间的沟通质量越高(Dikker et al., 2017; Holper et al., 2013; Jiang et al., 2012; Schippers et al., 2010; Stephens et al., 2010; Stolk et al., 2014), 其脑间活动同步也相应更强;

b. 合作任务: 相对于至少一人做出背叛决策的情形, 两人都选择合作策略时其脑间活动同步显著上升(Astolfi et al., 2009; Babiloni et al., 2007; King-Casas, 2005; De Vico Fallani et al., 2010; Hu et al., 2018; Jahng, Kralik, Hwang, & Jeong, 2017; Zhang et al., 2017);

c. 冲突任务: 脑间活动同步仅出现在回合型冲突任务中, 如棋盘任务(Liu et al., 2017; Liu et al., 2015)、积木任务(Liu et al., 2016)、视觉搜素任务(Balconi & Vanutelli, 2017)中, 而在同时型冲突任务, 如竞争按键任务中则未曾出现。

如前文所言, 任务所属的博弈类型反映了该任务中协作与冲突因素的多少(Schelling, 1980)。而任务的互动方式则被认为反映了脑间活动同步产生机制的差异: 同时型任务可反映被试身体动作的同步, 而回合型任务则反映了被试由意图、动机层面的"心智同步" (mindset synchrony)所产生的脑间活动同步(Liu & Pelowski, 2014)。为此, 结合各类别任务范式下的研究结论, 或可认为多人互动任务中是否存在协作因素, 以及是否涉及心理理论功能(即个体对他人意图的揣测与追踪), 是影响脑间活动同步产生的两大因素。在仅具备协作因素而无冲突因素的任务中, 如协作任务和双方均选择合作策略的合作任务, 被试出现了相较控制条件更高的脑间活动同步, 体现了任务所包含的协作因素对脑间活动同步的影响; 而在不具备协作因素, 却对追踪、揣测他人意图有较高要求的回合型冲突任务中, 同样出现了被试间的脑间活动同步现象, 且同步情形出现在涉及心理理论功能的 IFG 等脑区(Liu et al., 2016; Liu et al., 2017; Liu et al., 2015), 符合了个体心理理论功能可影响其脑间活动同步情形的假设, 表明对他人意图的揣测或可促使脑间活动同步的提升。

5　总结与展望

通过引入博弈论中的协作、合作与冲突概念, 本文为超扫描研究中的多人互动任务范式建立新的分类模型, 并对各类任务范式进行了总结与回顾。本文认为, 以博弈论概念为基础建立的多人互动任务模型可分辨已有研究中未得到严格区分的"协作"与"合作"概念, 更好地整合超扫描领域的研究结论。通过对该模型各分类下研究范式及其成果的总结, 本文认为任务本身是否包含协作因素, 以及任务是否涉及心理理论功能是影响脑间活动同步现象产生的重要因素。

在未来的研究中, 这一模型的提出或将对超扫描研究在以下领域的发展带来积极的贡献:

首先, 考察协作与合作行为的差异与联系将是未来超扫描研究中有待关注的主题。进化博弈论的相关研究表明, 协作与合作或具备相似的演化基础(Roos et al., 2015), 而超扫描研究则表明执行协作任务可对个体的合作倾向产生影响(Hu

et al., 2017)。未来超扫描研究可考虑同时考察协作与合作任务的多人脑机制，以进一步探索两者间的差异与联系。

其次，探讨合作、协作任务中规范形成的心理与脑机制将是超扫描研究的可行方向。规范(Norm)被认为是引导合作与协作行为的重要因素，常以习俗、文化、制度等形式出现(Colman, 2003; VanderLecq, F, 1996)。如在头尾游戏中，玩家常以“头”作为双方的一致选择即反映了个体对这一规范的内在偏好(De Jonge, 1998; Mehta, Starmer, & Sugden, 1994)。规范产生的神经机制仍未得到系统研究，或可成为值得关注的主题。

最后，博弈论视角下多人互动模型的提出将利于以超扫描为代表的实证研究与进化博弈论等理论模型的结合。如以协作任务为桥梁, Mu, Han 和 Gelfand (2017)等人以 EEG 超扫描技术验证了进化博弈模型中有关威胁影响个体合作、协作倾向的结果(Roos et al., 2015)，发现面临社会威胁时被试产生更强的合作倾向，体现为其联合按键任务成绩的提高与 gamma 波段脑间活动同步的增强。此类研究可促进社会认知神经科学与其它领域研究成果的结合，通过联系宏观与微观领域的研究成果，实现对社会互动更全面、深入的认识。

参考文献

李先春，卑力添，袁涤，丁雅娜，冯丹阳. (2018). 超扫描视角下的社会互动脑机制. *心理科学, 41*(6), 1484–1491. doi:10.16719/j.cnki.1671-6981.20180629.

叶佩霞，朱睿达，唐红红，买晓琴，刘超. (2017). 近红外光学成像在社会认知神经科学中的应用. *心理科学进展, 25*(5), 731–741. doi:10.3724/sp.j.1042.2017.00731.

张文莉，唐红红，刘超，买晓琴. (2016). 多人交互同步记录技术在大脑神经活动测量中的应用. *心理与行为研究, 14*(6), 834–841.

郑丽莉，成晓君，胡谊.，李先春. (2015). 超扫描的发展及其在教育领域的应用潜力. *教育生物学杂志*, 2(1), 35–42. doi:10.3969/j.issn.2095-4301.2015.01.008.

Ahn, S., Cho, H., Kwon, M., Kim, K., Kwon, H., Kim, B. S., … Jun, S. C. (2018). Interbrain phase synchronization during turn-taking verbal interaction-a hyperscanning study using simultaneous EEG/MEG. *Human Brain Mapping, 39*(1), 171–188, doi: 10.1002/hbm.23834.

Anders, S., Heinzle, J., Weiskopf, N., Ethofer, T., & Haynes, J. D. (2011). Flow of affective information between communicating brains. *NeuroImage, 54*(1), 439–446, doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.07.004.

Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., De Vico Fallani, F., Salinari, S., Marciani, M. G., … Babiloni, F. (2009). Estimation of the cortical activity from simultaneous multi-subject recordings during the prisoner's dilemma. In *Proceedings of 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 1937–1939). Minneapolis, MN, USA: IEEE, doi: 10.1109/IEMBS.2009.5333456.

Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., De Vico Fallani, F., Salinari, S., Vecchiato, G., … Babiloni, F. (2010). Imaging the social brain: Multi-subjects EEG recordings during the "Chicken's game". In *Proceedings of 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology* (pp. 1734–1737). Buenos Aires, Argentina: IEEE, doi: 10.1109/IEMBS.2010.5626708.

Astolfi, L., Toppi, J., Borghini, G., Vecchiato, G., Isabella, R., De Vico Fallani, F., ... Babiloni, F. (2011). Study of the functional hyperconnectivity between couples of pilots during flight simulation: An EEG hyperscanning study. In *the Proceedings of 2011 Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology* (pp.2338–2341). Boston, MA, USA: IEEE, doi:10. 1109/iembs.2011.6090654.

Astolfi, L., Toppi, J., Casper, C., Freitag, C., Mattia, D., Babiloni, F., … Siniatchkin, M. (2015). Investigating the neural basis of empathy by EEG hyperscanning during a Third Party Punishment. In *Proceedings of the 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 5384–5387). Milan, Italy: IEEE, doi: 10.1109/embc.2015.7319608.

Astolfi, L., Toppi, J., De Vico Fallani, F., Vecchiato, G., Salinari, S., Mattia, D., … Babiloni, F. (2010). Neuroelectrical hyperscanning measures simultaneous brain activity in humans. *Brain Topography, 23*(3), 243–256. doi:10.1007/s10548-010-0147-9.

Babiloni, C., Buffo, P., Vecchio, F., Marzano, N., Del Percio, C., Spada, D., … Perani, D. (2012). Brains "in concert": Frontal oscillatory alpha rhythms and empathy in professional musicians. *NeuroImage, 60*(1), 105–116, doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.12.008.

Babiloni, F., & Astolfi, L. (2014). Social neuroscience and hyperscanning techniques: Past, present and future. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 44,* 76–93. doi:10.1016/j.neubiorev.2012.07.006.

Babiloni, F., Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., Tocci, A., Tarantino, A., … De Vico Fallani, F. (2007). Cortical activity and connectivity of human brain during the Prisoner's Dilemma: An EEG hyperscanning study. In *Proceedings of 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology* (pp. 4953–4956). Lyon, France: IEEE, doi:10.1109/IEMBS.

2007.4353452

Baker, J. M., Liu, N., Cui, X., Vrticka, P., Saggar, M., Hosseini, S. M. H., & Reiss, A. L. (2016). Sex differences in neural and behavioral signatures of cooperation revealed by fNIRS hyperscanning. *Scientific Reports, 6,* 26492, doi: 10.1038/srep26492.

Balardin, J. B., Zimeo Morais, G. A., Furucho, R. A., Trambaiolli, L., Vanzella, P., Biazoli, C., Jr., & Sato, J. R. (2017). Imaging brain function with functional near-infrared spectroscopy in unconstrained environments. *Frontiers in Human Neuroscience, 11,* 258, doi: 10.3389/fnhum.2017.00258.

Balconi, M., Pezard, L., Nandrino, J. L., & Vanutelli, M. E. (2017). Two is better than one: The effects of strategic cooperation on intra-and inter-brain connectivity by fNIRS. *PLoS One*, *12*(11), e0187652, doi:10.1371/journal.pone.0187652.

Balconi, M., & Vanutelli, M. E. (2017). Brains in competition: Improved cognitive performance and inter-brain coupling by hyperscanning paradigm with functional near-infrared spectroscopy. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, *11*, 163, doi:10.3389/fnbeh. 2017.00163.

Cavallo, A., Lungu, O., Becchio, C., Ansuini, C., Rustichini, A., & Fadiga, L. (2015). When gaze opens the channel for communication: Integrative role of IFG and MPFC. *NeuroImage, 119,* 63–69, doi: 10.1016/j.neuroimage. 2015.06.025.

Cheng, X. J., Li, X. C., & Hu, Y. (2015). Synchronous brain activity during cooperative exchange depends on gender of partner: A fNIRS-based hyperscanning study. *Human Brain Mapping, 36*(6), 2039–2048, doi: 10.1002/hbm.22754.

Chiu, P. H., Kayali, M. A., Kishida, K. T., Tomlin, D., Klinger, L. G., Klinger, M. R., & Montague, P. R. (2008). Self responses along cingulate cortex reveal quantitative neural phenotype for high-functioning autism. *Neuron, 57*(3), 463–473, doi: 10.1016/j.neuron.2007.12.020.

Colman, A. M. (2003). Cooperation, psychological game theory, and limitations of rationality in social interaction. *Behavioral and Brain Sciences, 26*(2), 139–198. doi:10.1017/s0140525x03350058.

Cui, X., Bryant, D. M., & Reiss, A. L. (2012). NIRS-based hyperscanning reveals increased interpersonal coherence in superior frontal cortex during cooperation. *NeuroImage, 59*(3), 2430–2437, doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.09. 003.

Dawes, R. M., & Messick, D. M. (2000). Social dilemmas. *International Journal of Psychology*, *35*(2), 111–116. doi: 10.1080/002075900399402.

De Jonge, J. (1998). Coordination and cooperation in game theory. *Economist*, *146*(1), 159–167. doi:10.1023/A:1003262227223.

De Vico Fallani, F., Nicosia, V., Sinatra, R., Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., … Babiloni, F. (2010). Defecting or not defecting: How to "read" human behavior during cooperative games by EEG measurements. *PLoS ONE, 5*(12), e14187, doi: 10.1371/journal.pone.0014187.

Dikker, S., Wan, L., Davidesco, I., Kaggen, L., Oostrik, M., McClintock, J., … Poeppel, D. (2017). Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom. *Current Biology, 27*(9), 1375–1380, doi: 10.1016/j.cub.2017.04.002.

Duan, L., Dai, R. N., Xiao, X., Sun, P. P., Li, Z., & Zhu, C. Z. (2015). Cluster imaging of multi-brain networks (CIMBN): A general framework for hyperscanning and modeling a group of interacting brains. *Frontiers in Neuroscience, 9*, 267. doi:10.3389/fnins.2015.00267.

Dumas, G., Lachat, F., Martinerie, J., Nadel, J., & George, N. (2011). From social behaviour to brain synchronization: Review and perspectives in hyperscanning. *IRBM*, *32*(1), 48–53. doi:10.1016/j.irbm.2011.01.002.

Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J., & Garnero, L. (2010). Inter-brain synchronization during social interaction. *PLoS One*, *5*(8), e12166. doi:10.1371/journal.pone.0012166.

Filho, E., Bertollo, M., Tamburro, G., Schinaia, L., Chatel-Goldman, J., Di Fronso, S., … Comani, S. (2016). Hyperbrain features of team mental models within a juggling paradigm: A proof of concept. *PeerJ, 4,* e2457, doi: 10.7717/peerj.2457.

Funane, T., Kiguchi, M., Atsumori, H., Sato, H., Kubota, K., & Koizumi, H. (2011). Synchronous activity of two people's prefrontal cortices during a cooperative task measured by simultaneous near-infrared spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics, 16*(7), 077011, doi:10.1117/1.3602853.

Hari, R., Henriksson, L., Malinen, S., & Parkkonen, L. (2015). Centrality of social interaction in human brain function. *Neuron, 88*(1), 181–193, doi: 10.1016/j.neuron.2015.09.022.

Hasson, U., Ghazanfar, A. A., Galantucci, B., Garrod, S., & Keysers, C. (2012). Brain-to-brain coupling: A mechanism for creating and sharing a social world. *Trends in Cognitive Sciences, 16*(2), 114–121, doi: 10.1016/j.tics.2011.12.007.

Hirsch, J., Zhang, X., Noah, J. A., & Ono, Y. (2017). Frontal temporal and parietal systems synchronize within and across brains during live eye-to-eye contact. *NeuroImage, 157,* 314–330, doi: 10.1016/j.neuroimage.2017.06.018.

Holper, L., Goldin, A. P., Shalom, D. E., Battro, A. M., Wolf, M., & Sigman, M. (2013). The teaching and the learning brain: A cortical hemodynamic marker of teacher-student

interactions in the Socratic dialog. *International Journal of Educational Research, 59,* 1–10, doi: 10.1016/j.ijer. 2013.02.002.

Hu, Y., Hu, Y. Y., Li, X. C., Pan, Y. F., & Cheng, X. J. (2017). Brain-to-brain synchronization across two persons predicts mutual prosociality. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *12*(12), 1835–1844. doi:10. 1093/scan/nsx118.

Hu, Y., Pan, Y., Shi, X., Cai, Q., Li, X., & Cheng, X. (2018). Inter-brain synchrony and cooperation context in interactive decision making. *Biological Psychology, 133*, 54–62. doi:10.1016/j.biopsycho.2017.12.005.

Jahng, J., Kralik, J. D., Hwang, D. U., & Jeong, J. (2017). Neural dynamics of two players when using nonverbal cues to gauge intentions to cooperate during the Prisoner's Dilemma Game. *NeuroImage, 157,* 263–274, doi:10. 1016/j.neuroimage.2017.06.024.

Jiang, J., Chen, C. S., Dai, B. H., Shi, G., Ding, G. S., Liu, L., & Lu, C. M. (2015). Leader emergence through interpersonal neural synchronization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112*(14), 4274–4279, doi: 10.1073/pnas.1422930112.

Jiang, J., Dai, B. H., Peng, D. L., Zhu, C. Z., Liu, L., & Lu, C. M. (2012). Neural synchronization during face-to-face communication. *Journal of Neuroscience, 32*(45), 16064–16069, doi: 10.1523/JNEUROSCI.2926-12.2012.

Kawano, T., Majima, Y., Maekawa, Y., Katagiri, M., & Ishigame, A. (2016). Inter-brain synchronization between nurse and patient during drawing blood. In *Proceedings of the 9th International Conference on Health Informatics* (pp. 507–511). Setubal, Portugal: INSTICC Press, doi: 10.5220/0005825605070511.

King-Casas, B, Tomlin, D., Anen, C., Camerer, C. F., Quartz, S. R., & Montague, P. R. (2005). Getting to know you: Reputation and trust in a two-person economic exchange. *Science, 308*(5718), 78–83, doi: 10.1126/science.1108062.

Knoblich, G., Butterfill, S., & Sebanz, N. (2011). Psychological research on joint action: Theory and data. *Psychology of Learning and Motivation, 54*, 59–101. doi:10.1016/b978-0-12-385527-5.00003-6

Koike, T., Tanabe, H. C., & Sadato, N. (2015). Hyperscanning neuroimaging technique to reveal the "two-in-one" system in social interactions. *Neuroscience Research, 90,* 25–32, doi: 10.1016/j.neures.2014.11.006.

Konvalinka, I., Bauer, M., Stahlhut, C., Hansen, L. K., Roepstorff, A., & Frith, C. D. (2014). Frontal alpha oscillations distinguish leaders from followers: Multivariate decoding of mutually interacting brains. *NeuroImage*, *94*, 79–88. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.03.003.

Krill, A. L., & Platek, S. M. (2012). Working together may be better: Activation of reward centers during a cooperative maze task. *PLoS One*, *7*(2), e30613. doi:10.1371/journal.pone.0030613.

Leong, V., Byrne, E., Clackson, K., Georgieva, S., Lam, S., & Wass, S. (2017). Speaker gaze increases information coupling between infant and adult brains. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114*(50), 13290–13295, doi: 10.1073/pnas. 1702493114.

Lindenberger, U., Li, S. C., Gruber, W., & Müller, V. (2009). Brains swinging in concert: Cortical phase synchronization while playing guitar. *BMC Neuroscience, 10,* 22, doi: 10.1186/1471-2202-10-22.

Liu, N., Mok, C., Witt, E. E., Pradhan, A. H., Chen, J. E., & Reiss, A. L. (2016). NIRS-based hyperscanning reveals inter-brain neural synchronization during cooperative Jenga game with face-to-face communication. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10,* 82. doi:10.3389/fnhum.2016. 00082.

Liu, T., & Pelowski, M. (2014). Clarifying the interaction types in two-person neuroscience research. *Frontiers in Human Neuroscience, 8,* 276, doi: 10.3389/fnhum.2014. 00276.

Liu, T., Saito, G., Lin, C. H., & Saito, H. (2017). Inter-brain network underlying turn-based cooperation and competition: A hyperscanning study using near-infrared spectroscopy. *Scientific Reports, 7*(1), 8684, doi: 10.1038/s41598-017-09226-w.

Liu, T., Saito, H., & Oi, M. (2015). Role of the right inferior frontal gyrus in turn-based cooperation and competition: A near-infrared spectroscopy study. *Brain and Cognition, 99,* 17–23, doi: 10.1016/j.bandc.2015.07.001.

Louwerse, M. M., Dale, R., Bard, E. G., & Jeuniaux, P. (2012). Behavior matching in multimodal communication is synchronized. *Cognitive Science*, *36*(8), 1404–1426. doi:10.1111/j.1551–6709.2012.01269.x.

Mehta, J., Starmer, C., & Sugden, R. (1994). Focal points in pure coordination games: An experimental investigation. *Theory and Decision*, *36*(2), 163–185. doi:10.1007/BF01079211.

Miller, L. (2007). Coordination and collective action. *Revista Internacional de Sociología*, *65*(46), 161–183.

Montague, P. R., Berns, G. S., Cohen, J. D., McClure, S. M., Pagnoni, G., Dhamala, M., ... Fisher, R. E. (2002). Hyperscanning: Simultaneous fMRI during linked social interactions. *NeuroImage, 16*(4), 1159–1164. doi:10. 1006/nimg.2002.1150

Mu, Y., Guo, C. Y., & Han, S. H. (2016). Oxytocin enhances inter-brain synchrony during social coordination in male adults. *Social Cognitive and Affective Neuroscience, 11*(12), 1882–1893, doi: 10.1093/scan/nsw106.

Mu, Y., Han, S. H., & Gelfand, M. J. (2017). The role of

gamma interbrain synchrony in social coordination when humans face territorial threats. *Social Cognitive and Affective Neuroscience, 12*(10), 1614–1623, doi:10.1093/scan/nsx093.

Müller, V., Sänger, J., & Lindenberger, U. (2013). Intra-and inter-brain synchronization during musical improvisation on the guitar. *PLoS One*, *8*(9), e73852. doi:10.1371/journal.pone.0073852

Myerson, R. (1997). *Game theory: Analysis of conflict*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Naeem, M., Prasad, G., Watson, D. R., & Kelso, J. A. (2012). Electrophysiological signatures of intentional social coordination in the 10-12 Hz range. *NeuroImage*, *59*(2), 1795–1803. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.08.010.

Novembre, G., Sammler, D., & Keller, P. E. (2016). Neural alpha oscillations index the balance between self-other integration and segregation in real-time joint action. *Neuropsychologia, 89,* 414–425, doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2016.07.027.

Osaka, N., Minamoto, T., Yaoi, K., Azuma, M., Shimada, Y. M., & Osaka, M. (2015). How two brains make one synchronized mind in the inferior frontal cortex: fNIRS-based hyperscanning during cooperative singing. *Frontiers in Psychology, 6,* 1811, doi: 10.3389/fpsyg. 2015.01811.

Pan, Y. F., Cheng, X. J., Zhang, Z. X., Li, X. C., & Hu, Y. (2017). Cooperation in lovers: An fNIRS-based hyperscanning study. *Human Brain Mapping, 38*(2), 831–841, doi:10.1002/hbm.23421.

Pérez, A., Carreiras, M., & Duñabeitia, J. A. (2017). Brain-to-brain entrainment: EEG interbrain synchronization while speaking and listening. *Scientific Reports, 7*(1), 4190, doi: 10.1038/s41598-017-04464-4.

Roos, P., Gelfand, M., Nau, D., & Lun, J. (2015). Societal threat and cultural variation in the strength of social norms: An evolutionary basis. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *129*, 14–23. doi:10.1016/j.obhdp.2015.01.003.

Saito, D. N., Tanabe, H. C., Izuma, K., Hayashi, M. J., Morito, Y., Komeda, H., … Sadato, N. (2010). "Stay tuned": Inter-individual neural synchronization during mutual gaze and joint attention. *Frontiers in Integrative Neuroscience, 4,* 127, doi: 10.3389/fnint.2010.00127.

Sänger, J., Müller, V., & Lindenberger, U. (2012). Intra-and interbrain synchronization and network properties when playing guitar in duets. *Frontiers in Human Neuroscience, 6,* 312, doi: 10.3389/fnhum.2012.00312.

Sänger, J., Müller, V., & Lindenberger, U. (2013). Directionality in hyperbrain networks discriminates between leaders and followers in guitar duets. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 234. doi:10.3389/fnhum.2013.00234.

Schelling, T. C. (1980). *The strategy of conflict.* Cambridge (MA), Harvard University Press.

Schippers, M. B., Roebroeck, A., Renken, R., Nanetti, L., & Keysers, C. (2010). Mapping the information flow from one brain to another during gestural communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*(20), 9388–9393. doi:10.1073/pnas.1001791107.

Sinha, N., Maszczyk, T., Wanxuan, Z., Tan, J., and Dauwels, J. (2016). EEG hyperscanning study of inter-brain synchrony during cooperative and competitive interaction. In *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2016 IEEE International Conference on IEEE* (pp. 4813–4818). Budapest, Hungary: IEEE, doi:10.1109/SMC.2016.7844990.

Spiegelhalder, K., Ohlendorf, S., Regen, W., Feige, B., Tebartz van Elst, L., Weiller, C., … Tuscher, O. (2014). Interindividual synchronization of brain activity during live verbal communication. *Behavioural Brain Research, 258,* 75–79, doi: 10.1016/j.bbr.2013.10.015.

Stephens, G. J., Silbert, L. J., & Hasson, U. (2010). Speaker-listener neural coupling underlies successful communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107*(32), 14425–14430, doi: 10.1073/pnas.1008662107.

Stolk, A., Noordzij, M. L., Verhagen, L., Volman, I., Schoffelen, J. M., Oostenveld, R., … Toni, I. (2014). Cerebral coherence between communicators marks the emergence of meaning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111*(51), 18183–18188, doi: 10.1073/pnas.1414886111.

Tadić, B., Andjelković, M., Boshkoska, B. M., & Levnajić, Z. (2016). Algebraic topology of multi-brain connectivity networks reveals dissimilarity in functional patterns during spoken communications. *PLoS ONE, 11*(11), e0166787, doi: 10.1371/journal.pone.0166787.

Tang, H. H., Mai, X. Q., Wang, S., Zhu, C. Z., Krueger, F., & Liu, C. (2016). Interpersonal brain synchronization in the right temporo-parietal junction during face-to-face economic exchange. *Social Cognitive and Affective Neuroscience, 11*(1), 23–32, doi: 10.1093/scan/nsv092.

Tognoli, E., Lagarde, J., DeGuzman, G. C., & Kelso, J. A. (2007). The phi complex as a neuromarker of human social coordination. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*(19), 8190–8195. doi:10.1073/pnas.0611453104.

Toppi, J., Borghini, G., Petti, M., He, E. J., De Giusti, V., He, B., ... Babiloni, F. (2016). Investigating cooperative behavior in ecological settings: An EEG hyperscanning study. *PLoS One*, *11*(4), e0154236. doi:10.1371/journal.pone.0154236.

VanderLecq, F. (1996). Conventions and institutions in coordination problems. *De Economist*, *144*(3), 397–428. doi:10.1007/BF01682834

Vanutelli, M. E., Nandrino, J. L., & Balconi, M. (2016). The boundaries of cooperation: Sharing and coupling from ethology to neuroscience. *Neuropsychological Trends* (19), 83–104. doi:10.7358/neur-2016-019-vanu.

Yun, K., Watanabe, K., & Shimojo, S. (2012). Interpersonal body and neural synchronization as a marker of implicit social interaction. *Scientific Reports*, *2*, 959. doi:10.1038/srep00959.

Zhang, M. M., Liu, T., Pelowski, M., & Yu, D. C. (2017). Gender difference in spontaneous deception: A hyperscanning study using functional near-infrared spectroscopy. *Scientific Reports, 7*(1), 7508, doi: 10.1038/s41598-017-06764-1.

Zhdanov, A., Nurminen, J., Baess, P., Hirvenkari, L., Jousmaki, V., Makela, J. P., ... Parkkonen, L. (2015). An internet-based real-time audiovisual link for dual MEG recordings. *PLoS ONE, 10*(6), e0128485, doi:10.1371/journal.pone.0128485.

Zhou, G. Y., Bourguignon, M., Parkkonen, L., & Hari, R. (2016). Neural signatures of hand kinematics in leaders vs. followers: A dual-MEG study. *NeuroImage, 125,* 731–738, doi: 10.1016/j.neuroimage.2015.11.002.

From the view of game theory: A new model for hyperscanning multi-subject interaction paradigm

BEI Litian[1]; JIANG Ke[2]; LI Xianchun[1]; XIONG Zhehong[1]

([1] *School of Psychological and Cognitive Science, East China Normal University, Shanghai* 200062, *China*)

([2] *School of Psychiatry, Wenzhou Medical University, Wenzhou Zhejiang* 325035, *China*)

Abstract: Hyperscanning refers to measure neural activities simultaneously from two or more agents interacting in the same task, and explain the neural mechanism of interpersonal exchange. From the perspective of game theory, three types of tasks in hyperscanning researches are clarified: conflict, cooperation and coordination task, which contributes to distinguishing "coordination" and "cooperation", two concepts which are not well-defined in existing hyperscanning studies, and establishes a new model to depict the multi-subject paradigms in this area. Future studies might further explore the psychological and cerebral mechanism underlying the differences between cooperation and coordination behavior and the formation of norms, in combination with the usage of evolutionary game theory model.

Key words: cooperation; coordination; game theory; multi-subject interaction; hyperscanning